

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

PAULA FERNANDA FARIA

Desenvolvimento Conceitual de uma Superfície de Controle Redundante
Visando ao Aumento da Segurança Operacional

São Carlos
2025

PAULA FERNANDA FARIA

Desenvolvimento Conceitual de uma Superfície de Controle Redundante
Visando ao Aumento da Segurança Operacional

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Sistemas Aeronáuticos da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Especialista em Sistemas Aeronáuticos.

Orientador: Dr. Pedro David Bravo Mosquera

São Carlos

2025

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Sérgio Rodrigues Fontes
e pelo Serviço de Comunicação e Marketing da EESC-USP,
com dados inseridos pelo(a) autor(a).

F224d Faria, Paula
 Desenvolvimento Conceitual de uma Superfície de
 Controle Redundante Visando ao Aumento da Segurança
 Operacional / Paula Faria ; orientador Pedro Mosquera. --
 São Carlos, 2025.

 34 p.

 Trabalho de Conclusão de Curso - Especialização em
 Sistemas Aeronáuticos -- Escola de Engenharia de São
 Carlos da Universidade de São Paulo, 2025.

 1. controle de voo; morphing wings; superfícies de
 controle redundantes; segurança operacional; aeronaves..
 I. Mosquera, Pedro, orient. II. Título.

Responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação segundo a AACR2: Bibliotecários da EESC/USP.

FOLHA DE AVALIAÇÃO OU APROVAÇÃO

Candidato(a): Paula Fernanda Faria

Título do Trabalho: Estudo Conceitual de uma nova Superfície de Controle Redundante para Aumento da Segurança Operacional

Data da defesa: 29/12/2025

Comissão julgadora

Avaliador	Resultado (nota)
Pedro David Bravo Mosquera (orientador)	7,5
Jorge Henrique Bidinotto	7,5

Resultado final: **Aprovado**

Coordenador do Curso de Especialização em Sistemas Aeronáuticos
Prof. Associado **Jorge Henrique Bidinotto**

Vice-coordenador do Curso de Especialização em Sistemas Aeronáuticos
Prof. Associado **Hernán Darío Cerón Muñoz**

DEDICATÓRIA

Primeiramente dedico este trabalho ao meu Pai que retornou ao reino dos céus para junto de DEUS pai neste ano durante a minha formação, e ele foi quem sempre acreditou que eu poderia ser tudo o que eu quisesse e que sempre sorriu em orgulho quando eu falava que era uma aluna de Pós-graduação na USP, dedico também a minha mãe que junto ao meu pai me deram uma boa educação familiar e me possibilitaram de todas as formas para que eu pudesse ter uma formação superior algo que eles não tiveram acesso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo de toda a minha trajetória acadêmica e pessoal, tornando possível a concretização deste trabalho.

Manifesto meus sinceros agradecimentos ao coordenador do curso de Especialização em Sistemas Aeronáuticos da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto, pelo apoio institucional, pela condução do curso e pela contribuição para a formação acadêmica e profissional dos alunos.

Agradeço, de maneira especial, ao meu orientador, Pedro David Bravo Mosquera, pela orientação, disponibilidade, dedicação e valiosas contribuições técnicas, que foram fundamentais para o desenvolvimento e a qualidade deste trabalho.

Registro também meu reconhecimento à Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial (FIPAI), pelo incentivo financeiro por meio da concessão da bolsa de estudos, a qual foi essencial para a realização desta especialização.

Por fim, expresso minha profunda gratidão ao meu irmão, José Eduardo Faria, cuja orientação, apoio e exemplo foram determinantes em minha formação pessoal e na escolha do caminho que me conduziu à Engenharia.

EPÍGRAFE

“Pela fé entendemos que o universo foi formado pela palavra de Deus, de modo que aquilo que se vê não foi feito do que é visível.”

(HEBREUS 11:3, 2009, versão NVI p.
1296)

RESUMO

FARIA, P. T. **Desenvolvimento Conceitual de uma Superfície de Controle Redundante Visando ao Aumento da Segurança Operacional.** 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

A crescente complexidade dos sistemas aeronáuticos e os elevados requisitos de segurança operacional têm impulsionado o desenvolvimento de soluções inovadoras para o controle de voo. Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo conceitual de uma superfície de controle de voo redundante baseada no conceito de *morphing wings*, com o objetivo de aumentar a segurança operacional da aeronave. A proposta fundamenta-se na adaptação contínua da geometria da asa, por meio da variação de curvatura e torção, permitindo a geração de momentos aerodinâmicos adicionais capazes de complementar ou substituir superfícies de controle convencionais em situações de falha. São discutidos os princípios aerodinâmicos envolvidos, a modelagem conceitual do sistema de controle, bem como sua conformidade com os requisitos de certificação CS-25 e FAR-25. Adicionalmente, é realizada uma análise comparativa entre a superfície proposta e os sistemas tradicionais, evidenciando as vantagens da redundância funcional, da adaptabilidade às condições de voo e da potencial redução de penalidades aerodinâmicas. Os resultados conceituais indicam que a integração de superfícies de controle morfológicas pode contribuir de forma significativa para a manutenção da controlabilidade e para o aumento da segurança operacional em aeronaves de transporte.

Palavras-chave: controle de voo; *morphing wings*; superfícies de controle redundantes; segurança operacional; aeronaves.

ABSTRACT

FARIA, P. F. **Conceptual Development of a Redundant Flight Control Surface for Enhanced Operational Safety**. 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

The increasing complexity of aeronautical systems and the stringent operational safety requirements have driven the development of innovative flight control solutions. In this context, this work presents a conceptual study of a redundant flight control surface based on the morphing wings concept, aiming to enhance aircraft operational safety. The proposed approach relies on the continuous adaptation of wing geometry through variations in camber and twist, enabling the generation of additional aerodynamic moments capable of complementing or replacing conventional control surfaces under failure conditions. The study discusses the underlying aerodynamic principles, the conceptual modeling of the control system, and its compliance with CS-25 and FAR-25 certification requirements. Furthermore, a comparative analysis between the proposed surface and traditional control systems is conducted, highlighting the advantages of functional redundancy, adaptability to flight conditions, and the potential reduction of aerodynamic penalties. The conceptual results indicate that the integration of morphing-based control surfaces can significantly contribute to maintaining aircraft controllability and enhancing operational safety in transport-category aircraft.

Keywords: flight control; morphing wings; redundant control surfaces; operational safety; aircraft.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Superfícies de controle de voo de uma aeronave convencional.....	18
Figura 2 - Classificação das adaptações de acordo com a reconfiguração geométrica das asas..	23
Figura 3 - Forças aerodinâmicas em um aerofólio.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens X Desafios/Riscos em sistemas de controle de voo combinados.....	21
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATR	Avions de Transport Régional
CS-25	Certification Specifications for Large Aeroplanes
FAR-25	Federal Aviation Regulations – Transport Category Airplanes
FBW	Fly-By-Wire
NASA	National Aeronautics and Space Administration
VCCTEF	Variable Camber Continuous Trailing Edge Flap

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Matriz de estados do sistema
- B – Matriz de controle do sistema
- C_L – Coeficiente de sustentação
- C_M – Coeficiente de momento de arfagem
- C_l – Coeficiente de momento de rolagem
- Δc – Variação do camber (curvatura do aerofólio)
- $\Delta\theta$ – Variação da torção da asa
- δ_{conv} – Comando das superfícies convencionais
- δ_m – Comando da superfície morfológica
- x – Vetor de estados do sistema
- \dot{x} – Derivada temporal do vetor de estados

Sumário

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivo e metodologia.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Contexto histórico	17
2.2 Definição	17
2.3 Desafios e Falhas	20
2.3.1 Falhas eletrônicas ou de programação	20
2.3.2 Dependência de sistemas eletrônicos.....	20
2.3.3 Redução de superfícies independentes	20
2.3.4 Dificuldades com diagnóstico e reparo de falhas	20
2.3.5 Treinamento e resposta do piloto (Fator humano)	21
3 Conceitualização.....	22
3.1 Morphing.....	22
3.1.1 Conceito Geral de Morphing Wings	25
3.1.2 Mecanismos de Morphing Aplicados às Asas	25
3.1.3 Variação de Torção (Twist Morphing).....	26
3.1.4 Funcionamento do Sistema de Morphing	26
3.1.5 Consumo Energético em Sistemas Morphing	26
3.1.6 Comparação com Superfícies de Controle Convencionais.....	27
3.2 Superfície de Controle de Voo Redundante com Geometria Adaptativa	27
3.3 Modelagem Conceitual de Controle da Superfície Redundante.....	29
3.4 Considerações de Certificação (CS-25 / FAR-25).....	29
3.5 Análise Comparativa entre Superfícies de Controle Convencionais e a Superfície Redundante Morfológica	30
4 CONCLUSÃO	32

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos sistemas de controle de voo, as inovações tecnológicas e a necessidade constante de melhoria contínua da qualidade de operação no cockpit, tem se tornado um tópico cada vez mais presente dentro do mundo aeronáutico, tanto aos aviadores quanto para os cientistas e desenvolvedores.

Tem se observado nas últimas duas décadas um movimento exponencial no desenvolvimento de superfícies combinadas e redundantes, com o objetivo de aumentar a manobrabilidade e a segurança operacional.

No intuito de reduzir o número de superfícies móveis nas aeronaves, vem sendo usual a combinação de sistemas de controle de voo como : Elevons(elevators+ailerons), Ruddervators(rudder+elevators), Flaperons(flaps+ailerons) e Spoilerons(spoilers+ailerons usados para o controle de rolamento), muitas companhias aéreas já integram suas frotas com aeronaves que operam com essas tecnologias como Boeing 777 e Boeing 747 e também tais tecnologias encontram-se presentes em aeronaves de Defesa como: Concorde, Lockheed F-117 Nighthawk, F-16 Fighting Falcon e Bombardier Dash 8.

E uma das mais atuais e modernas combinações está o Fly-by-Wire com controle combinado usado em Aeronaves modernas, sobretudo militares e grandes jatos comerciais como Airbus A320, A350 e Lockheed Martin F-22 Raptor.

Todavia tais combinações podem gerar desafios em caso de falhas e ou inexperiência operacional do sistema (Fator Humano). Este trabalho propõe um estudo conceitual de uma nova superfície de controle, analisando seus possíveis benefícios e desafios em relação a configurações existentes.

1.1 Objetivo e metodologia

Este trabalho foi elaborado com o objetivo de desenvolver e apresentar um conceito inovador de superfície de controle de voo que ofereça redundância funcional, garantindo segurança operacional e melhor desempenho aerodinâmico. A nova superfície será comparada com sistemas convencionais para avaliar sua viabilidade e/ou melhoria da tecnologia já existente, levando em consideração os desafios e lições aprendidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Contexto histórico

No início do século XX, as primeiras aeronaves foram desenvolvidas com sistemas de controle de voo simples e separadas com ailerons, leme e profundor, que funcionavam de forma individual e independentes. Cada superfície tinha função única, e os pilotos tinham a necessidade de coordenar todo o sistema manualmente.

Entre as décadas de 1920-1940 durante a segunda Guerra Mundial, houve a necessidade de aeronaves com mais velocidade e maior complexidade utilizados nos caças de combate, daí então surgiram os primeiros estudos para reduzir o número de superfícies móveis, diminuir o peso e arrasto e tornar o controle mais integrado e eficiente durante a operação. Começou-se a ser testadas Asas em delta e caudas em V, o que exigiu o uso de superfícies combinadas como elevons e ruddervators.

Já em 1950-1980 com a chegada dos aviões supersônicos e dos aviões furtivos, as altas velocidades exigiam menos superfícies salientes para evitar o arrasto e eco de radar. Cada vez mais começou a serem feitas as integrações através de computadores primitivos, controlando as superfícies combinadas para garantir maior estabilidade da aeronave.

Atualmente os sistemas Fly-By-Wire estão presentes em muitas aeronaves, o que os tornou a revolução nas aeronaves, onde computadores calculam automaticamente os devidos movimentos para a execução da manobra desejada, permite que superfícies diferentes trabalhem de forma combinada em tempo real como flaperons e spoilerons, tornando possível aviões instáveis devido seu design serem controlados de forma segura.

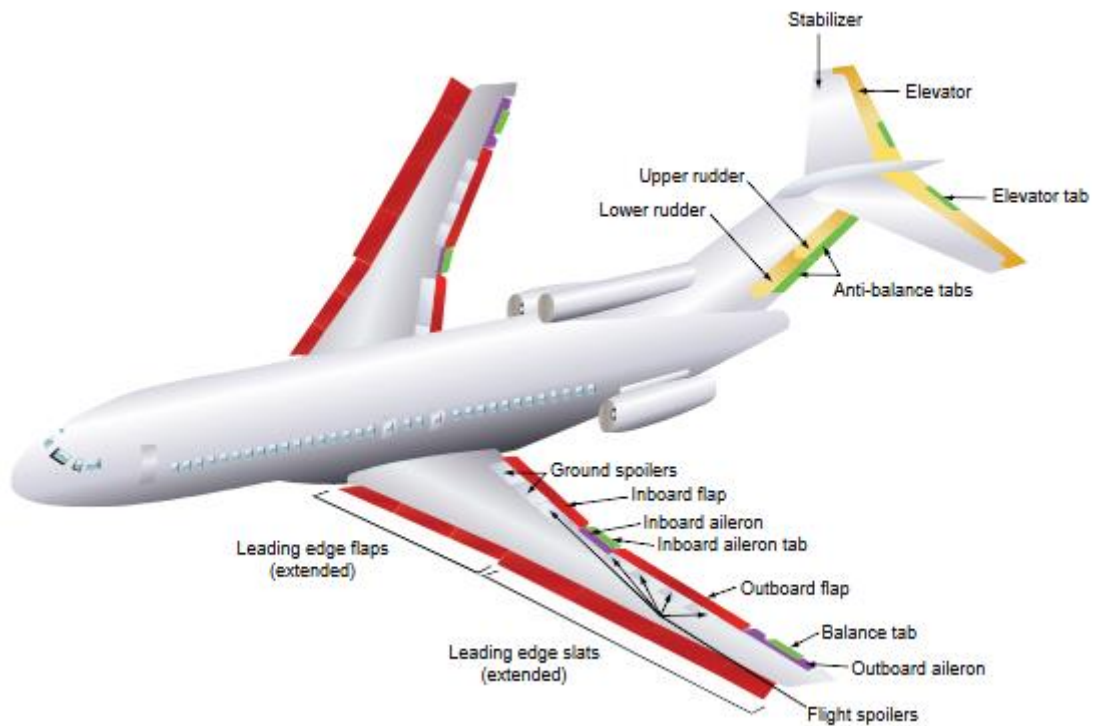
Hoje já se observa um movimento de desenvolvimento ainda maior utilizando sistemas combinados e integrando cada vez mais superfícies moveis e inteligentes para que tenham resultados de maior eficiência, melhor performance em todas as fases de voo e redução de peso, de custo e de complexidade mecânica.

2.2 Definição

Superfície de Controle

Parte móvel de uma aeronave projetada para modificar sua altitude ou trajetória durante o voo, alterando o fluxo de ar e permitindo que o piloto controle os movimentos em torno dos três eixos: longitudinal (rolamento), lateral (arfagem) e vertical (guinada).

Figura 1 – Superfícies de controle de voo de uma aeronave convencional



Arrasto

Força aerodinâmica resistente ao movimento da aeronave no ar, resultante do atrito do ar com a superfície da aeronave e pela separação do fluxo de ar ao redor dela.

Aerodinâmica

Ramo da física que estuda o comportamento do ar (ou de gases) em movimento e os efeitos desse movimento sobre corpos sólidos, como aeronaves, automóveis e prédios.

Aileron

Superfície que controlam o rolamento (movimento de inclinação lateral), responsável por fazer o giro da aeronave em torno do eixo longitudinal, localizados nas bordas de fuga das asas, geralmente mais próxima as suas extremidades.

Leme

Superfície que controla a guinada (movimento para esquerda ou direita) em torno do eixo vertical, localizada na parte traseira da aeronave, na superfície vertical da cauda.

Profundor

Superfície que controla a arremetida/picada (subida ou decida do nariz da aeronave) em torno do eixo lateral, localizada na parte traseira das superfícies horizontais da cauda.

Elevons

São superfícies combinadas que funcionam como aileron quanto como profundor, são muito comuns em aeronaves sem cauda vertical, como asas delta.

Ruddervators

São superfícies que combinam o controle da quinada e arfagem, são utilizadas em aeronaves com configuração de cauda em V.

Flaperons

São superfícies que combinadas funciona como flap (aumenta sustentação/arrasto) e como aileron, comumente utilizada em aeronaves que buscam reduzir o número de superfícies móveis para economizar no peso e complexidade.

Spoilerons

São superfícies que tem a função de rolar e combinada com a ajuda no controle lateral, usadas para melhor controle a altas velocidades ou em aeronaves de asa alta.

Fly-By-Wire

Os comandos de voo são feitos por sistemas eletrônicos que combinam inputs do piloto para otimizar o movimento de todas as superfícies ao mesmo tempo.

2.3 Desafios e Falhas

Os sistemas de controle de voo combinados embora sejam muito eficientes e modernos, apresentam grandes desafios e riscos específicos, especialmente quando ocorrem falhas, se destacando as seguintes:

2.3.1 Falhas eletrônicas ou de programação

Superfícies combinadas são controladas por computadores ou sistemas embarcados, tornando o sistema mais complexo, o que podem afetar mútuas funções ao mesmo tempo, dificultando o controle da aeronave.

2.3.2 Dependência de sistemas eletrônicos

Aeronaves modernas, o piloto não move diretamente as superfícies, mas envia comandos para um controlador que os interpreta e realiza os acionamentos, em caso de falha seja desse controlador ou de qualquer componente eletrônico, a aeronave pode perder a capacidade de resposta e o piloto o controle do avião levando a grandes catástrofes.

2.3.3 Redução de superfícies independentes

Devido as funções combinadas, a falha em uma única superfície pode afetar simultaneamente outras funções do sistema, levando a grandes pausas na operação da aeronave para reparo e a perda parcial de controle.

2.3.4 Dificuldades com diagnóstico e reparo de falhas

Identificar a causa exata da falha se torna complexa devido à complexidade do sistema, visto que os sistemas estão integrados e operando simultaneamente, e nem sempre se é possível reverter para modo manual ou independe as superfícies de controle.

2.3.5 Treinamento e resposta do piloto (Fator humano)

Em situações de falha e perda do controle do avião, a interpretação do comportamento da aeronave pode ser mais difícil, pois os comandos não correspondem de forma direta as superfícies, o que requer pilotos altamente qualificados e treinados para lidar com sistemas combinados.

Em 2009 o Airbus A330 – Voo Air France 447 apresentou falha nos sensores de velocidade que comprometeu o sistema Fly-By-Wire levando a perda do controle da aeronave e a pressurização da cabine que resultou na queda do avião e na morte de mais de 200 pessoas a bordo da aeronave.

Mais recentemente em 2024 com o voo 2Z2283 um ATR 72-500 que apresentou falha no sistema de degelo, que levou a perda de controle da aeronave, na redução de seu desempenho e aumento de velocidade, que levou a queda do avião, resultando na morte de 62 ocupantes.

Um Lockheed F-117 em fase de testes devido a um bug de software no sistema de controle de voo levou a queda.

A tabela 1 abaixo irá fazer um comparativo entre vantagens e desafios em relação a sistemas de controle de voo combinados:

Tabela 1 – Vantagens X Desafios/Riscos em sistemas de controle de voo combinados

Aspecto	Vantagens	Desafios/Riscos
Eficiência aerodinâmica	Menor arrasto, melhor desempenho	Menos superfícies disponíveis para controle redundante
Capacidade de manobra	Maior agilidade e controle mais preciso (especialmente em aviões de caça)	Falhas afetam mais de um eixo de controle
Tecnologia Fly-By-Wire	Computadores otimizam os comandos em tempo real	Dependência total de software, sensores e eletrônicos
Manutenção mecânica	Menos peças móveis e conexões mecânicas	Diagnóstico mais complexo em caso de falha
Resposta a comandos	Comandos mais suaves, adaptativos e otimizados	Em caso de falha, resposta pode ser não intuitiva ou ausente
Integração com sistemas stealth	Redução de superfícies salientes melhora furtividade	Limitações no uso de superfícies redundantes
Treinamento e operação	Automação reduz a carga de trabalho do piloto	Exige treinamento avançado para lidar com falhas complexas ou não convencionais

3 Conceitualização

3.1 Morphing

A tecnologia também tem o potencial de simplificar e até eliminar totalmente sistemas de controle convencionais mecanicamente complexos e pesados, reduzindo o arrasto aerodinâmico e o ruído (Özgen et al., 2010)

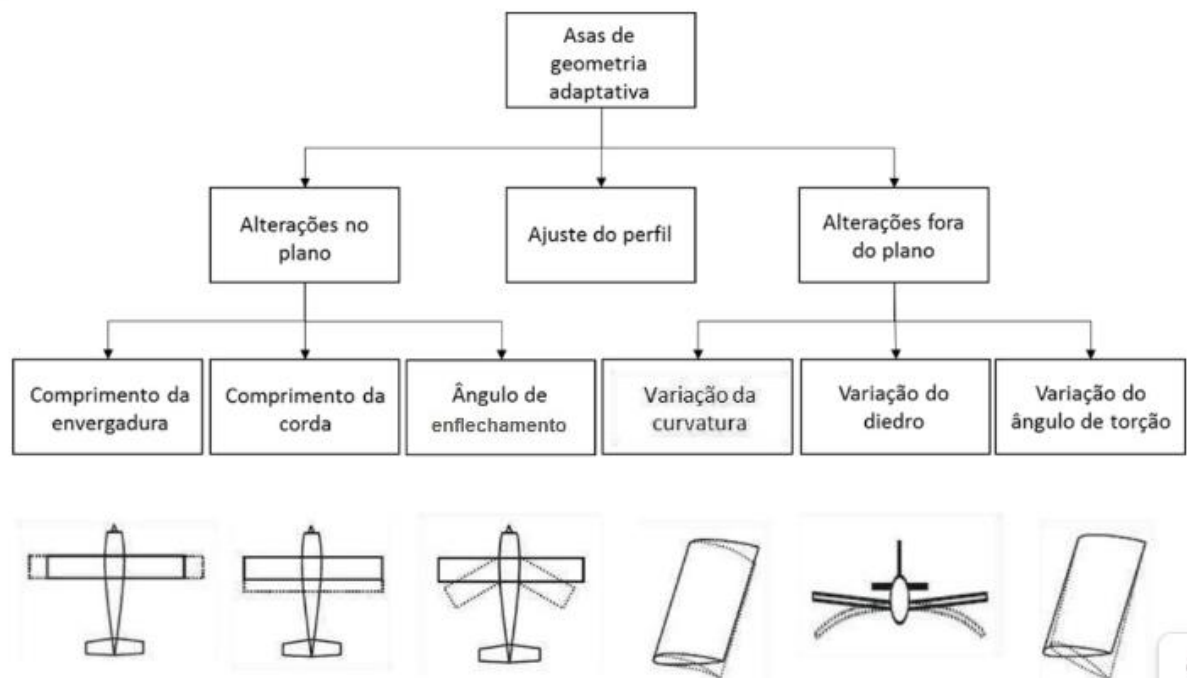
Em resumo, uma asa morphing foi projetada para ser 'adaptativa', o que significa ser capaz de mudar de forma autônoma durante o voo, sem fendas ou degraus nas superfícies da asa, para minimizar os possíveis impactos no arrasto aerodinâmico, usando um sistema de controle sem qualquer intervenção direta do piloto.

Estudos conduzidos em túnel de vento foi verificado que os melhores desempenhos foram nas condições de maiores reconfigurações geométricas, de todas as seções da asa simultaneamente (Emeliava, 2016)

Abordagens realizadas em relação aos conceitos de aerofólio com curvatura para aeronaves comerciais, entre eles o conceito de bordo de fuga com linha de curvatura média variável (VCCTEF) para aplicação em aeronaves comerciais, que vem sendo desenvolvido pela NASA há alguns anos (Nguyen et al., 2015). Conclui-se que uma redução significativa do arrasto por intermédio da aplicação do conceito aerofólio morphing e grande potencial para economia de combustível e energia pela mudança adaptativa do aerofólio durante o voo (Marciniuk et al., 2024).

Tuba et al. (2021) classificou a transformação da asa em três grandes categorias: transformação no plano, transformação fora do plano e ajuste de perfil, conforme mostra a Figura 1, a seguir.

Figura 2 -Classificação das adaptações de acordo com a reconfiguração geométrica das asas

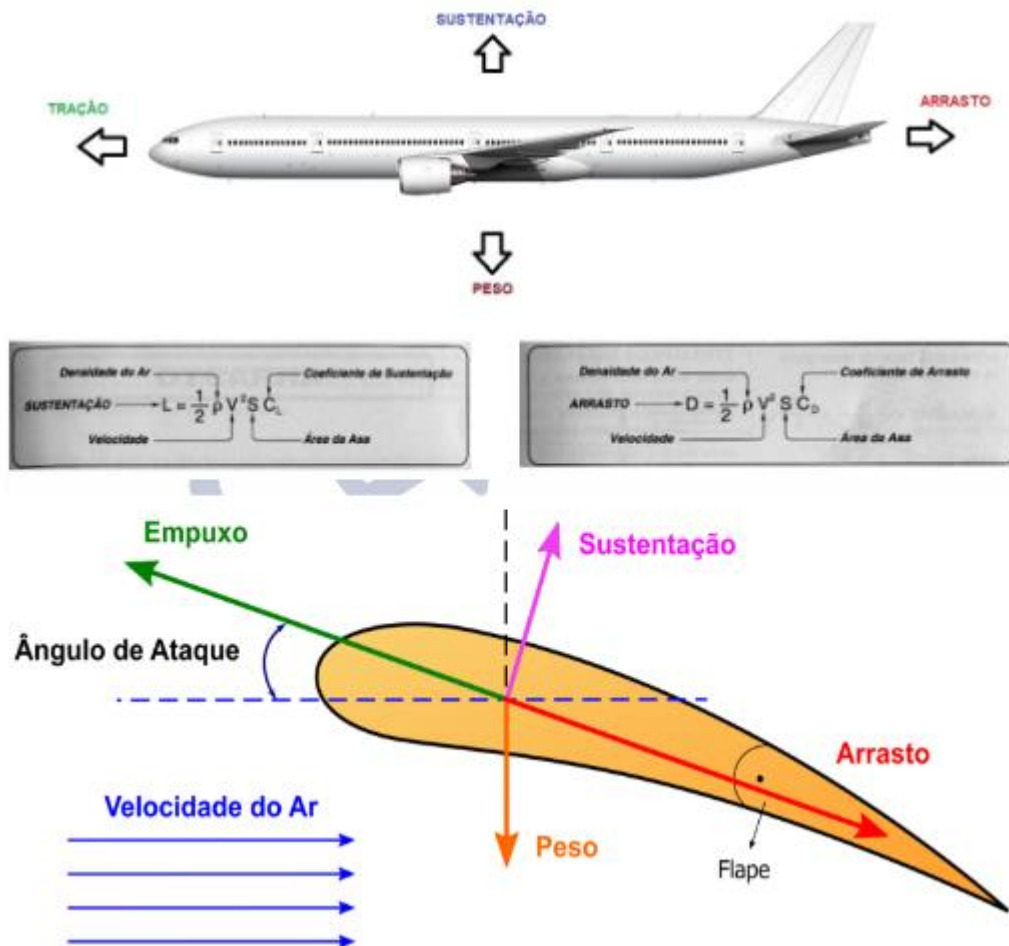


Fonte: Adaptado de Emeliavaca, 2016, p. 22.

Em razão da complexidade inerente aos fenômenos aerodinâmicos, a determinação da geometria ideal da carenagem de uma aeronave está diretamente associada às condições de voo, as quais são descritas pelas equações de Navier–Stokes. Nessas circunstâncias, o escoamento do ar em torno das superfícies sustentadoras é governado por equações diferenciais não lineares,

para as quais não existem soluções analíticas fechadas. Assim, a análise aerodinâmica dos diferentes componentes da aeronave é conduzida de forma específica, considerando-se cada configuração individualmente, a fim de se obter uma representação mais fiel das condições reais de operação. Para viabilizar essa análise, adotam-se diversas hipóteses simplificadoras voltadas à descrição do movimento da aeronave, permitindo o desenvolvimento de modelos teóricos aplicáveis a partes ou regimes de voo particulares. A partir da compreensão aprofundada desses efeitos aerodinâmicos, torna-se possível direcionar os estudos para a otimização geométrica da aeronave sob condições operacionais previamente definidas. (Figura2)

Figura 3 -Forças aerodinâmicas em um aerofólio



A Figura 2 ilustra, de forma esquemática, as principais forças atuantes sobre a asa de uma aeronave: sustentação, empuxo, arrasto e peso. A sustentação é responsável por manter a aeronave em voo, sendo gerada predominantemente pelas asas em função do movimento relativo em relação ao ar. O empuxo, produzido pelo sistema de propulsão, impulsiona a aeronave e atua no sentido de vencer o arrasto aerodinâmico e o peso. O arrasto corresponde às forças que se opõem ao movimento, resultantes da resistência do ar.

O conceito de *morphing* está associado à adaptação da geometria da aeronave às diferentes condições de voo, dependendo da forma, dimensões, inclinação e características do escoamento. Em baixas velocidades, o ajuste geométrico dos flaps permite aumentar a sustentação durante a decolagem e elevar o arrasto na aproximação para pouso, contribuindo para a redução da velocidade (KUMAR, 2002). O arrasto aerodinâmico pode ser classificado em componentes associadas ao atrito viscoso e aos gradientes de pressão, destacando-se, neste estudo, o arrasto induzido e o arrasto parasita.

3.1.1 Conceito Geral de Morphing Wings

O conceito de *Morphing Wings* refere-se ao desenvolvimento de asas capazes de **alterar continuamente sua geometria durante o voo**, de forma controlada e reversível, com o objetivo de **otimizar o desempenho aerodinâmico**, ampliar a **capacidade de controle** e aumentar a **eficiência energética** da aeronave em diferentes regimes de operação. Diferentemente das superfícies de controle convencionais, que utilizam deflexões discretas por meio de articulações mecânicas, as asas *morphing* promovem **deformações suaves e distribuídas**, preservando a continuidade geométrica da superfície aerodinâmica.

Essas adaptações geométricas podem ocorrer de maneira **local ou global**, envolvendo variações no perfil aerodinâmico, na torção ao longo da envergadura ou até mesmo na área efetiva da asa. O princípio fundamental do *morphing* é permitir que a aeronave se aproxime, em cada fase do voo, de uma configuração aerodinâmica ideal, reduzindo penalidades associadas a arrasto, consumo de combustível e limitações de controle.

3.1.2 Mecanismos de Morphing Aplicados às Asas

Os mecanismos de *morphing* podem ser classificados, de forma geral, em três categorias principais: **variação de curvatura (camber morphing)**, **variação de torção (twist morphing)** e **reconfiguração global da asa**. No contexto deste trabalho, destacam-se os dois primeiros, por sua aplicabilidade direta ao controle de voo e à redundância funcional.

3.1.2.1 Variação de Curvatura (Camber Morphing)

O *camber morphing* consiste na alteração contínua da **linha média do perfil aerodinâmico**, permitindo modificar a curvatura da asa sem a introdução de fendas ou descontinuidades. Essa variação influencia diretamente o coeficiente de sustentação C_L e o momento de arfagem C_M , possibilitando ajustes finos no desempenho aerodinâmico.

Em baixas velocidades, como durante a decolagem e a aproximação para pouso, o aumento do camber resulta em maior sustentação para um mesmo ângulo de ataque, reduzindo a velocidade de estol. Em cruzeiro, a redução da curvatura permite minimizar o arrasto, contribuindo para maior eficiência energética. Diferentemente dos flaps convencionais, o camber morphing evita a formação de vórtices intensos e o aumento significativo do arrasto parasita.

3.1.3 Variação de Torção (Twist Morphing)

A variação de torção ao longo da envergadura da asa, conhecida como *twist morphing*, permite alterar o ângulo de incidência local das seções aerodinâmicas. Esse mecanismo é particularmente eficaz na geração de momentos de rolagem, podendo atuar como alternativa ou complemento aos ailerons tradicionais.

Ao modificar a distribuição de sustentação ao longo da asa, o twist morphing possibilita um controle mais suave e progressivo, reduzindo cargas estruturais e melhorando a resposta dinâmica da aeronave. Além disso, essa técnica contribui para o alívio de cargas em condições críticas, como rajadas ou manobras bruscas.

3.1.4 Funcionamento do Sistema de Morphing

O funcionamento de uma asa morphing baseia-se na integração entre **estrutura flexível, atuadores distribuídos, sensores embarcados e sistemas de controle**. A estrutura da asa é projetada para permitir deformações controladas, mantendo, ao mesmo tempo, resistência suficiente para suportar cargas aerodinâmicas e estruturais.

Os atuadores podem ser eletromecânicos, pneumáticos ou baseados em materiais inteligentes, como ligas com memória de forma (SMA) e materiais piezoelétricos. Sensores de deformação, pressão e aceleração fornecem informações em tempo real ao computador de controle de voo, que calcula a geometria ideal da asa conforme a fase de voo e as condições ambientais.

Esse processo ocorre de forma automática e contínua, sem necessidade de intervenção direta do piloto, o que torna o sistema especialmente adequado para aeronaves com controle *Fly-by-Wire* e arquiteturas tolerantes a falhas.

3.1.5 Consumo Energético em Sistemas Morphing

O consumo energético associado às asas morphing está diretamente relacionado ao tipo de atuador empregado e à frequência de reconfiguração geométrica. Em geral, esses sistemas

apresentam **baixo consumo energético em regime estacionário**, uma vez que a maior demanda ocorre apenas durante a transição entre configurações.

Materiais inteligentes, como ligas com memória de forma, demandam energia principalmente durante a ativação térmica inicial, mantendo a deformação com consumo reduzido. Atuadores eletromecânicos distribuídos, por sua vez, permitem maior precisão de controle, com eficiência energética compatível com sistemas de controle convencionais.

Além disso, o ganho energético indireto proporcionado pela redução do arrasto e pela otimização do desempenho aerodinâmico pode superar o consumo adicional do sistema morphing, resultando em **economia líquida de combustível** ao longo da missão.

3.1.6 Comparação com Superfícies de Controle Convencionais

As superfícies de controle tradicionais, como flaps, ailerons e profundores, operam por meio de deflexões angulares discretas, introduzindo descontinuidades geométricas que aumentam o arrasto parasita e geram cargas concentradas. Embora apresentem elevada maturidade tecnológica, essas superfícies possuem limitações quanto à adaptabilidade e à redundância funcional.

Em contraste, as asas morphing oferecem:

- **Continuidade aerodinâmica**, reduzindo perdas por arrasto;
- **Atuação distribuída**, aumentando a eficiência do controle;
- **Redundância funcional**, permitindo manter a controlabilidade mesmo em falhas de superfícies convencionais;
- **Maior integração com sistemas automáticos**, favorecendo arquiteturas *fail-safe* e *fail-operational*.

Dessa forma, o morphing não se propõe a substituir integralmente os sistemas tradicionais, mas a atuar de forma complementar, ampliando a margem de segurança operacional e o desempenho global da aeronave.

3.2 Superfície de Controle de Voo Redundante com Geometria Adaptativa

A segurança operacional de uma aeronave está diretamente associada à confiabilidade e à redundância de seus sistemas de controle de voo. Falhas em superfícies primárias, como ailerons, profundores ou lemes, podem comprometer significativamente a controlabilidade da aeronave, sobretudo em regimes críticos de voo. Nesse contexto, propõe-se o desenvolvimento

conceitual de uma superfície de controle redundante integrada à asa, baseada no conceito de *morphing wings*, capaz de atuar de forma complementar ou substitutiva aos comandos convencionais.

A superfície proposta consiste em um segmento da asa com geometria adaptativa, capaz de variar localmente sua curvatura (*camber*) e torção ao longo do semiespan. Essa variação geométrica permitiria a geração de momentos aerodinâmicos adicionais em torno dos eixos longitudinal e longitudinal-transversal, possibilitando o controle da atitude da aeronave mesmo em cenários de falha parcial ou total de superfícies primárias. Diferentemente de superfícies articuladas convencionais, o *morphing* ocorre de forma contínua, reduzindo descontinuidades geométricas e penalidades aerodinâmicas associadas ao arrasto parasita.

Do ponto de vista da segurança de voo, a redundância funcional dessa superfície permite a manutenção da controlabilidade em condições anormais, contribuindo para o atendimento aos requisitos de *fail-safe* e *fail-operational*. Em emergências, o sistema pode ser acionado automaticamente por meio do computador de controle de voo, ajustando a geometria da asa de modo a compensar assimetrias aerodinâmicas, perda de eficiência de comandos ou alterações no envelope de voo.

A atuação da superfície de controle morfológica também pode ser adaptada às diferentes fases da missão. Em baixas velocidades, sua configuração favorece o aumento da sustentação e da autoridade de controle, auxiliando nas fases de decolagem e pouso. Em cruzeiro, a geometria pode ser otimizada para minimizar o arrasto, mantendo-se em regime passivo ou com pequenas correções para estabilidade. Essa capacidade adaptativa contribui não apenas para a segurança, mas também para a eficiência aerodinâmica global da aeronave.

Do ponto de vista estrutural e de integração, o sistema pode empregar materiais inteligentes, como ligas com memória de forma ou atuadores eletromecânicos distribuídos, associados a sensores de deformação e pressão. Essa arquitetura possibilita monitoramento contínuo da integridade da superfície e detecção precoce de falhas, reforçando os princípios de segurança operacional.

Assim, a adoção de uma superfície de controle de voo redundante baseada no conceito de *morphing wings* representa uma solução promissora para o aumento da segurança operacional, ao ampliar a tolerância a falhas, preservar a controlabilidade da aeronave e adaptar a resposta aerodinâmica às condições de voo, atendendo às exigências contemporâneas de confiabilidade e desempenho aeronáutico.

3.3 Modelagem Conceitual de Controle da Superfície Redundante

A superfície de controle redundante baseada em *morphing wings* pode ser modelada como um atuador aerodinâmico contínuo, cuja variável de controle está associada à variação geométrica local da asa, como a alteração do *camber* Δc e da torção $\Delta \theta$. A dinâmica longitudinal e lateral-direcional da aeronave pode ser representada, de forma linearizada, por:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$$

em que \mathbf{x} representa o vetor de estados (ângulo de ataque, razão de arfagem, ângulo de rolagem, etc.) e \mathbf{u} o vetor de comandos, incluindo os atuadores convencionais e o comando morfológico δ_m .

A contribuição aerodinâmica da superfície redundante pode ser expressa como um incremento nos coeficientes aerodinâmicos:

$$\Delta C_L = C_{L\delta_m} \delta_m$$

$$\Delta C_M = C_{M\delta_m} \delta_m$$

$$\Delta C_l = C_{l\delta_m} \delta_m$$

onde $C_{L\delta_m}$, $C_{M\delta_m}$ e $C_{l\delta_m}$ representam as derivadas aerodinâmicas associadas à deformação da asa. Dessa forma, a superfície morfológica pode gerar momentos adicionais de arfagem e rolagem, permitindo compensar falhas em profundos ou ailerons.

Em condições de falha, a lógica de controle pode ser formulada de modo que:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \delta_{conv} \\ \delta_m \end{bmatrix} \text{ com } \delta_m = f(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{ref})$$

onde δ_m atua como comando redundante, sendo ativado automaticamente para restaurar a estabilidade e a controlabilidade da aeronave.

3.4 Considerações de Certificação (CS-25 / FAR-25)

Do ponto de vista regulatório, a superfície de controle redundante deve atender aos requisitos de aeronavegabilidade aplicáveis a aviões de transporte da categoria CS-25 / FAR-25. Em particular, destacam-se os seguintes critérios:

- **CS-25.671 / FAR 25.671 – Sistemas de controle de voo:** o sistema morfológico deve apresentar confiabilidade compatível com sistemas primários, não podendo introduzir modos de falha catastróficos. Sua atuação deve ser previsível e controlável em todas as condições operacionais.
- **CS-25.672 / FAR 25.672 – Estabilidade aumentada e sistemas automáticos:** caso integrado a sistemas automáticos de compensação de falhas, o controle por *morphing* deve permitir desativação manual e não comprometer a pilotagem da aeronave.
- **CS-25.1309 / FAR 25.1309 – Equipamentos, sistemas e instalações:** a superfície redundante deve atender aos critérios de *fail-safe* e *fail-operational*, demonstrando que falhas simples não resultam em condições perigosas ou catastróficas.
- **CS-25.143 / FAR 25.143 – Controlabilidade e manobrabilidade:** mesmo na presença de falhas em superfícies convencionais, a aeronave deve manter controlabilidade adequada por meio da atuação da superfície redundante.

Assim, a integração de uma superfície de controle de voo redundante baseada em *morphing wings* deve ser acompanhada de uma arquitetura de controle tolerante a falhas, validação aerodinâmica das derivadas associadas à deformação da asa e demonstração de conformidade com os requisitos de certificação, assegurando ganhos efetivos na segurança operacional da aeronave.

3.5 Análise Comparativa entre Superfícies de Controle Convencionais e a Superfície Redundante Morfológica

As superfícies de controle de voo tradicionalmente empregadas em aeronaves — como ailerons, profundores, lemes e dispositivos hipersustentadores — baseiam-se em superfícies articuladas, com deflexões discretas que produzem variações nos coeficientes aerodinâmicos. Esses sistemas apresentam elevada maturidade tecnológica, ampla validação experimental e conformidade consolidada com os requisitos de certificação CS-25 / FAR-25. Entretanto, sua eficácia está diretamente associada à integridade mecânica e à disponibilidade funcional de cada superfície, o que pode representar uma limitação em cenários de falha.

Em contraste, a superfície de controle redundante proposta, fundamentada no conceito de *morphing wings*, caracteriza-se pela modificação contínua da geometria da asa, permitindo variações graduais de curvatura e torção. Essa abordagem elimina articulações convencionais, reduzindo descontinuidades geométricas e, conseqüentemente, penalidades associadas ao

aumento do arrasto parasita. Além disso, a atuação distribuída ao longo da asa amplia a capacidade de geração de momentos aerodinâmicos, favorecendo o controle em regimes críticos de voo.

Do ponto de vista da segurança operacional, as superfícies convencionais atendem aos princípios de redundância por meio da duplicação de sistemas mecânicos e hidráulicos. Todavia, falhas estruturais ou bloqueios mecânicos podem comprometer simultaneamente múltiplas superfícies. A superfície morfológica, por sua vez, oferece redundância funcional, uma vez que sua atuação independe do movimento de superfícies articuladas específicas, possibilitando a manutenção da controlabilidade mesmo na ocorrência de falhas severas em comandos primários.

Em termos de controle e resposta dinâmica, as superfícies convencionais apresentam elevada autoridade de controle, porém com variações abruptas associadas às deflexões angulares. A superfície morfológica permite ajustes suaves e contínuos, resultando em respostas aerodinâmicas mais progressivas e potencialmente mais estáveis, especialmente quando integradas a sistemas de controle automático tolerantes a falhas.

Por outro lado, a implementação de superfícies de *morphing* envolve desafios tecnológicos relevantes, como a complexidade estrutural, a necessidade de materiais inteligentes e a validação de confiabilidade em longo prazo. Ademais, os processos de certificação ainda não estão plenamente consolidados para esse tipo de tecnologia, exigindo demonstrações adicionais de segurança e conformidade regulatória quando comparadas às superfícies convencionais.

De forma geral, enquanto as superfícies de controle tradicionais permanecem como solução robusta e amplamente certificada, a superfície de controle redundante baseada em *morphing wings* apresenta vantagens significativas em termos de adaptabilidade, tolerância a falhas e potencial aumento da segurança operacional. Assim, essa nova abordagem não se propõe a substituir integralmente os sistemas existentes, mas a atuar de forma complementar, ampliando a margem de segurança e a resiliência do sistema de controle de voo.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu avaliar, em nível conceitual, a viabilidade da aplicação de uma superfície de controle de voo redundante baseada no conceito de *morphing wings* como estratégia para o aumento da segurança operacional de aeronaves. A análise desenvolvida demonstrou que a modificação contínua da geometria da asa possibilita a geração de esforços aerodinâmicos adicionais, capazes de manter a estabilidade e a controlabilidade da aeronave mesmo em cenários de falha parcial ou total de superfícies de controle convencionais.

A comparação com os sistemas tradicionais evidenciou que, embora estes apresentem elevada maturidade tecnológica e processos de certificação consolidados, a superfície morfológica oferece vantagens relevantes, tais como maior adaptabilidade às condições de voo, redundância funcional e potencial redução de descontinuidades aerodinâmicas. Além disso, a integração desse tipo de superfície aos sistemas de controle automático pode atender aos princípios de *fail-safe* e *fail-operational* exigidos pelas normas CS-25 e FAR-25.

Apesar dos benefícios identificados, destaca-se que a implementação prática dessa tecnologia ainda impõe desafios significativos, especialmente no que se refere à complexidade

estrutural, à confiabilidade dos atuadores e aos processos de certificação. Dessa forma, recomenda-se que trabalhos futuros aprofundem a modelagem aerodinâmica, a análise estrutural e a validação experimental da superfície proposta, visando à sua aplicação segura e eficiente em aeronaves reais.

REFERÊNCIAS

KUMAR, P. **Morphing aircraft technology – new shapes for aircraft design**. Defence Science Journal, New Delhi, v. 52, n. 2, p. 141–154, 2002.

ANDERSON, J. D. **Fundamentals of aerodynamics**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.

ETKIN, B.; REID, L. D. **Dynamics of flight: stability and control**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 1996.

NELSON, R. C. **Flight stability and automatic control**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1998.

BARBARINO, S. et al. **A review of morphing aircraft**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, London, v. 22, n. 9, p. 823–877, 2011.

RODRIGUES, L. C.; INMAN, D. J. **Concepts for morphing aircraft structures**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, London, v. 18, n. 1, p. 3–13, 2007.

EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY. **Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes (CS-25)**. Cologne, 2023.

Disponível em:

<https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-large-aeroplanes-cs-25> Acesso em: 17 dez. 2025

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Code of Federal Regulations – Title 14, Part 25: Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes (FAR-25)**.

Washington, DC, 2023.

COOK, M. V. **Flight dynamics principles**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.

WIKIPÉDIA. **Voo Air France 447**. Disponível em:

https://pt.wikipedia.org/wiki/Voo_Air_France_447. Acesso em: 29 abr. 2025.

SILVA, João P.; OLIVEIRA, Maria L. **Conceito e benefícios de asas transformáveis (*morphing*) na aviação civil**. *Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas*, Florianópolis, v. 4, n. 3, p. 107–132, 2024. Disponível em:

<https://rbac.cia.emnuvens.com.br/revista/article/view/250/316>. Acesso em: 29 abr. 2025.

WEISSHAAR, T. A. **Morphing aircraft systems: historical perspectives and future challenges**. *Journal of Aircraft*, Reston, v. 50, n. 2, p. 337–353, 2013.

MCKAY, M. D.; IRWIN, R. T. **Failure tolerant flight control systems**. *Progress in Aerospace Sciences*, Oxford, v. 42, n. 4, p. 237–282, 2006.